

2.8. ПРОЦЕССЫ НА ПОВЕРХНОСТЯХ БЕЗАТМОСФЕРНЫХ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ

к.ф.-м.н. Л. В. Старухина

Безатмосферными космическими объектами являются твердые тела в космическом пространстве, поверхность которых не окружена (или окружена слабой) газовой оболочкой. К ним относятся объекты различных размеров, строения и происхождения. Это планеты (Луна, Меркурий, Марс), астероиды, кометы, метеоритные тела, а также космическая пыль – межпланетная, межзвездная или околозвездная. Все эти объекты объединяет то, что их поверхности не защищены от столкновений даже с мелкими метеоритами и от космических излучений. Ни слабая магнитосфера Меркурия, ни разреженные атмосферы комет не могут полностью защитить их поверхности от таких воздействий.

Поверхность крупных безатмосферных тел покрыта обломочным материалом – реголитом, верхние слои которого представляют собой мелкий песок. Изменения такой поверхности под воздействием космической среды называют созреванием. Эти изменения касаются физических и химических свойств реголита как на макроскопическом уровне (грунт в целом), так и на микроскопическом (поверхностные нанослои частиц). Они влияют на оптические свойства грунта, в первую очередь, на его спектр. Созревание поверхностей, сложенных силикатами или смесями льдов с органическим веществом, проявляет себя заметным потемнением и покраснением. Некоторые процессы в твердых частицах, происходящие под действием космогенных факторов, могут быть промоделированы теоретически или в лабораторных условиях. Ряд работ такого рода был выполнен в нашем НИИ астрономии.

Образование и эволюция органического вещества в космическом пространстве

Поверхность безатмосферных тел подвержена воздействию ионизирующих излучений. Это, главным образом, протоны в диапазоне энергий от КэВ (звездный, в частности, солнечный, ветер) до МэВ (солнечные космические лучи) и ГэВ (галактические космические лучи), а также фотоны от ультрафиолетового до рентгеновского диапазонов. В околозвездной среде спектры этих излучений таковы, что число частиц быстро падает с увеличением их энергии (за исключением участка модуляции спектра галактических лучей звездным ветром). Проникающая способность этих излучений, наоборот, возрастает с увеличением энергии, при этом максимум энерговыделения смещается вглубь мишени. В результате, поверхностный слой твердого вещества толщиной ~100 – 1000 ангстрем облучается в околозвездной среде (в частности, в Солнечной системе), главным образом, звездным (в частности, солнечным) ветром – протонами с энергией ~1–10 КэВ. В этом разделе мы рассмотрим химические эффекты такого облучения.

Широко известно, что ионизирующие излучения представляют опасность для живых организмов, так как могут изменять и разрушать сложные многоатомные молекулы, входящие в их состав. Менее тривиальным обстоятельством является то, что свободные радикалы, создаваемые такими излучениями, могут способствовать образованию новых химических связей, что наблюдали во многих лабораториях, например, [1, 2], в частности, простейших органических молекул из неорганического вещества. Это делает возможным органический синтез в условиях космического пространства.

Органическое вещество, основными элементами которого являются связанные между собой атомы углерода и водорода, может образовываться и эволюционировать в результате одного из двух противоположных процессов – карбонизации и гидрогенизации, при которых происходит обогащение исходного углеродсодержащего вещества атомами, соответственно, углерода и водорода. Первый из этих процессов имеет место в смесях льдов H_2O , CO_2 , CH_4 , NH_3 и других замороженных газов, встречающихся на периферии планетных систем – в частности, на поверхности спутников Юпитера и Сатурна, транснептуновых объектов и комет. Под действием ионизирующих излучений происходит обогащение смесей льдов более тяжелыми атомами и соединение их с углеродом в органические

молекулы. Так, после облучения твердого метана (CH_4) ионами $^3\text{He}^{2+}$ с энергией 20 МэВ обнаружены разнообразные молекулы, включая полиароматические соединения (ПАУ), включающие в себя два и более бензольных колец [3].

Появление органического вещества во льдах проявляет себя оптически их потемнением и «покраснением»: органические молекулы поглощают свет в ультрафиолетовом диапазоне, и края полос поглощения дают большее потемнение в синей области спектра, чем в красной. В результате первоначально «белые» образцы льда (кривая 0 на рис. 2.8.1) по мере облучения постепенно приобретают коричневатый цвет (кривые 1-3 на рис. 2.8.1). Спектры такого материала напоминают спектры ряда небесных тел: D-астероидов, спутников Юпитера и Сатурна, транснептуновых объектов.

Дальнейшая эволюция органического вещества на поверхности D-астероидов и транснептуновых объектов при его облучении изучалась в совместных работах сотрудников Харьковской обсерватории с сотрудниками Немецкого аэрокосмического центра (DLR) и обсерватории г. Катанья (Сицилия) (Moroz et al., 2003, 2004, 2007). При облучении органических веществ асфальтитового ряда ионами, летящими со скоростью солнечного ветра, происходило обеднение мишеней водородом за счет уменьшения числа алифатических групп ($-\text{CH}_2$, $-\text{CH}_3$) и увеличения концентрации ароматических групп, то есть структура органического вещества приближалась к графитоподобной. Это приводило к дальнейшему увеличению поглощения света частицами образцов, и они заметно темнели в диапазоне 1 – 2.5 мкм. При этом в видимом диапазоне мнимая часть показателя преломления возрастала настолько, что частицы приобретали металлический блеск, а отражательная способность образца в видимой области увеличивалась. В результате первоначально наклонный спектр становился плоским, подобным спектру графита (кривая 4 на рис. 2.8.1).

Таким образом, лабораторные эксперименты показали, что потемнение поверхностей ледяных тел в результате эволюции органического вещества под действием космических излучений лишь в начале сопровождается характерным «покраснением» спектра, далее спектральный наклон должен уменьшаться с экспозиционным возрастом, т. к. потемнение затрагивает и ближний ИК диапазон. Этот вывод согласуется с данными о цветовых вариациях в динамически изолированных популяциях темных астероидов. Наиболее многочисленные мелкие астероиды групп Гильды и Кибелы обладают большими амплитудами кривых блеска и большими разбросами скоростей вращения и спектральных наклонов, чем более крупные астероиды тех же групп [4, 5], что свидетельствует в пользу более позднего образования мелких астероидов в результате столкновений. Такие «молодые» астероиды оказались более «красными», чем крупные астероиды тех же групп [5], чьи оптические и динамические характеристики указывают на больший возраст их поверхностей.

Однако длительное облучение не может полностью уничтожить органическое вещество, превратив его в графит, поскольку ионная бомбардировка не только разрушает имеющиеся химические связи C–H, но и образует новые. При большой концентрации водорода в образце преобладает разрушение C–H-связей, при малой – их образование, т. е. процесс гидрогенизации. Образование на поверхности графита простейших органических молекул – газов CH_4 , C_2H_2 – при его облучении протонами с энергией порядка кэВ наблюдалось физиками, исследовавшими свойства графита как перспективного материала внутренней стенки термоядерных реакторов (см. обзоры [6, 7]).

Образование более сложных органических молекул на поверхности облучаемого графита изучалось в Харьковской обсерватории (Шкуратов и др., 1986, Shkuratov et al., 1987, Старухина и др., 1991, Старухина и Шкуратов, 1994, Starukhina and Shkuratov, 1995). Было обнаружено, что при облучении графита протонами и другими ионами с энергией, близкой к энергиям ионов солнечного и звездного ветра (H, He, N, 10 КэВ), на поверхности образуются органические вещества – полиароматические углеводороды (ПАУ). Энергичные ионы как бы вырезают фрагменты гексагональной графитовой сетки, так что крайние атомы углерода образующихся молекул оказываются связанными не с соседями по кристаллической решетке, а с атомами водорода.

Вначале появление ПАУ после облучения было выявлено на основании спектров УФ поглощения гексановых экстрактов облученного и необлученного образцов (Шкуратов и др., 1986); в дальнейшем был сделан качественный и количественный анализ полученных ПАУ (Старухина и др., 1991). Были обнаружены нафталин, фенантрен, бензофлуорен, пирен. Эти лабораторные эксперименты моделируют две ситуации, возникающие в космическом пространстве.

(1) Вблизи углеродных звезд имеются облака графитовой пыли, облучаемые звездным

ветром. ПАУ – самые распространенные органические молекулы в межзвездной среде [8]. Их синтез в газовой фазе затруднен из-за разреженности среды. Количественный анализ ПАУ, полученных нами при лабораторном облучении, показал, что количество ПАУ, наблюдаемое в межзвездной среде, можно объяснить их образованием на поверхности графитовых пылинок, облучаемых звездным ветром (Старухина и Шкуратов, 1994, Starukhina and Shkuratov, 1995).

(2) В солнечной системе графитоподобные отложения могут иметь место вокруг кратеров на поверхностях углеродсодержащих тел, например, астероидов С-типа или на Фобосе [9]. Как следует из наших экспериментов, под действием солнечного ветра графитоподобное вещество на поверхности может быть снова преобразовано в органическое. В частности, так могла образоваться часть ПАУ, имеющих в углеродсодержащих метеоритах – углистых хондритах. Образование ПАУ на поверхности графитовых отложений проявляет себя поглощением в ультрафиолетовой области (Shkuratov et al., 1987), подобным тому, что имеет место в спектре Фобоса и углистых хондритов. При образовании ПАУ металлический блеск графита сменяется полосой поглощения, характерной для поглотителя-диэлектрика.

Моделирование состава поверхности Фобоса

Интерес к моделированию процессов на углеродсодержащих телах и их спектров в значительной мере был вызван миссией «Фобос» в 1988 году. Плотность, альbedo и поляриметрические характеристики Фобоса указывали на то, что его ближайшим метеоритным аналогом являются углистые хондриты (Шкуратов и др., 1988, Жуков и др., 1994, Шкуратов, 1994) – метеориты, содержащие до нескольких процентов органического вещества. На это указывали и спектральные данные [10]: плоский спектр в диапазоне 0,4 – 1,1 мкм и резкое падение отражения на более коротких волнах. Однако более поздние измерения, проведенные на АМС «Фобос-2» [11] и космическом телескопе «Хаббл» [12] показали, что спектр Фобоса имеет красный наклон, характерный для D-астероидов, но альbedo Фобоса почти вдвое выше. Это может быть вызвано космогенными факторами, которые воздействуют как на силикатную, так и на органическую компоненту материала поверхности. Кроме солнечного ветра и метеоритной бомбардировки, на поверхность спутников Марса может оказать влияние дополнительный фактор – пыль, попадающая с Марса.

При помощи теоретической модели спектрального хода альbedo многокомпонентных реголитоподобных поверхностей (Старухина и Шкуратов, 1996, Shkuratov et al., 1999) было промоделировано влияние различных факторов на спектр углистого хондрита самого примитивного (CI) типа – метеорита Оргей (Старухина и Шкуратов, 1997). Хотя модель является геометрооптической, она позволяет работать не только со смесями частиц много больше длины волны λ , но и с квазиоднородными тонкодисперсными ($\ll \lambda$) смесями компонент, а также с частицами, покрытыми тонкими ($\ll \lambda$) пленками или содержащими выделения наночастиц вблизи поверхности или в объеме частиц реголита. Модель является обратимой, т. е. по спектру альbedo среды, состоящей из полупрозрачных частиц, позволяет определить спектр мнимой части показателя преломления $\kappa(\lambda)$ (точнее, оптической плотности $\tau(\lambda)$) частиц. Беря за основу такой спектр и спектры $\kappa(\lambda)$ дополнительных компонент, можно модифицировать состав реголита и вычислять спектр альbedo смеси.

Как известно из анализа образцов лунного грунта, воздействие космогенных факторов на силикатные частицы приводит к образованию в них зерен восстановленного железа $n\text{Fe}^0$ [13] среднего размера 50 ангстрем [14], что вызывает потемнение и покраснение грунта. Теоретическое моделирование изменения спектра лунного грунта при образовании зерен $n\text{Fe}^0$ было впервые сделано в работе (Starukhina et al., 1994). Аналогичное моделирование изменения спектра углистого хондрита Оргей показало, что его форма еще достаточно далека от спектра Фобоса. Моделирование добавления к веществу углистых хондритов красной марсианской пыли также не воспроизвело наклонный спектр Фобоса.

Таким образом, спектр Фобоса свидетельствует об отличии состава его органического вещества от вещества углистых хондритов. Авторы работы [12] предположили, что состав Фобоса напоминает состав D-астероидов. D-астероиды не имеют метеоритных спектральных аналогов, но имеют аналог лабораторный [15] – смесь минералов глин с полимерным органическим веществом. В непрерывном ряду природных органических полимеров – битум-

ном ряду – наклон спектра в видимом и ближнем ИК диапазоне падает с уменьшением концентрации алифатических связей, т. е. с возрастанием степени карбонизации, стремясь в пределе (для графита) к нулю.

В работе (Старухина и Шкуратов, 1997) построена модель спектра Фобоса из составляющих, подобных использованым в лабораторном моделировании [15]. Частицы на поверхности Фобоса представлены в виде тонкодисперсной смеси гидросиликатов и веществ битумного ряда (рис. 2.8.2 а). В качестве исходных данных для вычислений брались измеренные спектры отражения этих веществ [16,17]. Расчеты показали, что более высокое альbedo Фобоса по сравнению с D-астероидами может быть объяснено примерно в полтора раза меньшим размером частиц на Фобосе, что представляется возможным в связи с более интенсивной метеоритной бомбардировкой вблизи орбиты Марса. В отличие от модельных спектров (рис. 2.8.2 а), спектр Фобоса не содержит полос поглощения кристаллизационной воды и групп ОН (1,4 мкм, 1,9 и 2,7 мкм), за исключением слабо выраженной полосы 2,7 мкм, что можно объяснить дегидратацией при метеоритной бомбардировке. Для дегидратации достаточно разогрева гидросиликатов до $\approx 600^\circ\text{C}$, что заведомо достигается при метеоритных ударах.

Таким образом, органическое вещество поверхности Фобоса, по-видимому, содержит больше алифатических групп, т. е. больше водорода, чем органические полимеры углистых хондритов. Другой возможной моделью поверхности Фобоса является материал, структурно неоднородный в субмикронных масштабах, покрытый углеродной пленкой. Такая пленка могла конденсироваться на поверхности при осаждении ударного пара [9]. На рис. 2.8.2 б показаны результаты лабораторного и теоретического моделирования осаждения углеродной пленки на поверхность тонкодисперсной смеси сажи и MgO. Тонкая структура смеси, где темные и светлые зерна чередуются в субмикронных масштабах, ответственна за фотометрические и поляризметрические свойства углистых хондритов и Фобоса, что и определяет выбор структурного аналога. Из рис. 2.8.2 б видно, что спектр отражения вещества, являющегося аналогом углистых хондритов лишь по структуре, приближается к спектру Фобоса при маскировании тонкой углеродной пленкой. Сходство со спектром Фобоса становится еще ближе после облучения этой пленки протонами дозой 10^{16} см^{-2} с энергией 10 кэВ, имитирующими воздействие солнечного ветра (Шкуратов и др., 1988). В отличие от облученных веществ битумного ряда (см. выше), наклон спектра углеродной пленки графитоподобной структуры при облучении увеличивается.

Влияние контактов между частицами на физические свойства лунного грунта

Лунный грунт удивил исследователей тем, что его частицы необычайно сильно слипались между собой и прилипали к другим предметам: поверхности космических аппаратов, костюмам астронавтов и т. п. Многие физические свойства лунного грунта подробно изучались. В то же время, его когезия исследовалась мало, а ее механизмы поняты в недостаточной мере. Механизмы когезии и их следствия детально проанализированы в наших работах, см., например, (Старухина, 2000).

Почему реголитовые частицы слипаются? Из «земного» опыта мы знаем, что лучше всего слипаются частицы, покрытые влагой: поверхностное натяжение пленки воды скрепляет их между собой, – в то время как сухой песок весьма рассыпчатый. Можно было ожидать, что лунный песок, который является абсолютно сухим, будет еще более рассыпчатым, а оказалось наоборот. Причина в чистоте лунной поверхности, недостижимой в земных условиях.

Физический механизм когезии прост: вместо двух поверхностей с удельными энергиями α_1 и α_2 в области контакта частиц образуется одна – граница раздела с удельной энергией α_{12} . Чем больше разность $\Delta\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 - \alpha_{12}$, тем больше выигрыш в энергии при слипании частиц и больше сила, удерживающая контакт: $F_c = 2\pi\Delta\alpha/(1/R_1 + 1/R_2)$, где R_1 и R_2 – радиусы кривизны частиц в местах контактов. Для двух одинаковых сферических частиц радиуса R : $F_c = \pi R\Delta\alpha$; для частиц, сильно различающихся по размерам ($r \ll R$) $F_c = 2\pi r\Delta\alpha$, т. е. сила определяется большей кривизной мелкой частицы. Последняя формула описывает также силу слипания между частицами с шероховатой поверхностью; тогда r – радиус кривизны шероховатости.

Поверхностное натяжение твердого вещества с высокой температурой плавления на порядок превышает привычное поверхностное натяжение жидкостей. В земной атмосфере

энергия твердой поверхности не проявляет себя, так как все поверхности покрыты адсорбированными слоями – газами, водой, органическим веществом, – которые резко понижают поверхностную энергию, снижая прочность контактов между частицами. Даже разреженная атмосфера типа марсианской может приводить к понижению поверхностной энергии частиц. В высоком вакууме космического пространства мы имеем твердые поверхности высокой чистоты; для них сила слипания F_c определяется значениями $\Delta\alpha$, характерными именно для твердого вещества, и поэтому сцепление частиц оказывается заметно прочнее известного нам из земного опыта.

Это свойство чистой поверхности сохраняется довольно длительное время, особенно при хранении образцов в вакууме. Поскольку в формулу для силы входит $\Delta\alpha$, то для хорошего сцепления достаточно чистоты лишь одной из соприкасающихся поверхностей. Земной аналог чистой поверхности – свежий скол, который также обладает значительной адгезией.

Как измерить площадь контакта между частицами? Средняя площадь межчастичных контактов πR_c в образце определяет такие макроскопические свойства грунта, как электро- и теплопроводность. Электропроводность диэлектриков, составляющих частицы грунта, может различаться на много порядков, в то время как теплопроводность отличается незначительно, поэтому можно оценить теплопроводность пористого материала η , исходя из теплопроводности сплошного материала η_0 : $\eta = \eta_0 s (R_d/R)^2$, где $s \approx 0,5$ – доля площади, занимаемой частицами в произвольном сечении пористого грунта (она равна их объемной доле). При типичных значениях теплопроводности $\eta_0 \approx 3 \cdot 10^5$ эрг·см⁻¹·с⁻¹·К⁻¹, $\eta \approx 20$ эрг·см⁻¹·с⁻¹·К⁻¹ и радиуса частиц лунного грунта $R = 3 \cdot 10^{-3}$ см получим $R_c \approx 1,1$ мкм.

Величина контакта может рассказать о его прочности и механизмах формирования. Под действием капиллярной силы в начальный момент происходит упругая деформация частиц и образуется контакт небольшой площади. Если бы рост контакта на этом прекратился, теплопроводность лунного грунта была бы в 5-8 раз меньше наблюдаемой. Контакт увеличивается под действием капиллярных напряжений на окружности, являющейся границей контактного круга. Вещество течет, заполняя и закругляя контактное острие (рис. 2.8.3), пока капиллярные напряжения α/r_c , которые в начальный момент обращались в бесконечность ($r_c = 0$), не станут меньше предела текучести. Именно такому, более широкому, контакту соответствует полученная выше оценка радиуса.

Пластическое течение в контакте занимает от долей секунды до часов; с падением напряжения оно сменяется вязким течением, которое происходит путем диффузии атомов, что на много порядков медленнее. Масштабы времени процессов на поверхности небесных тел – тысячи и миллионы лет, что может оказаться достаточным для проявления эффектов капиллярного течения твердого вещества. Одно из следствий такого течения мы рассмотрим ниже.

Почему на Луне мало мелких частиц? В лунном грунте наблюдается дефицит микронных и субмикронных частиц [18,19]. Одной из причин этого могут быть капиллярные эффекты. Оказывается, течение твердого вещества в контакте между частицами может приводить к «растеканию» мелких пылинок по поверхности более крупных частиц, когда от меньшей остается лишь бугорок. И вообще, течение вещества под действием капиллярных сил будет приводить к сглаживанию неровностей на поверхности реголитовых частиц и уменьшать их шероховатость.

Подобные явления наблюдались в лабораториях – при высоких температурах, чтобы уменьшить время экспериментов до нескольких дней или часов. Температура лунной поверхности близка к комнатной, однако масштаб времени процессов – тысячи и миллионы лет. Время увеличения радиуса кривизны от $r/2$ до r равно [20]: $\tau_{1/2} \approx (kT/\alpha D_s)(r/a)^4$, где k – постоянная Больцмана, $a \approx 2 \cdot 10^{-8}$ см – межатомное расстояние, D_s – коэффициент поверхностной диффузии. Поскольку $D_s \sim \exp(-U/kT)$, это обеспечивает резкое ускорение процесса с температурой T . Видно, что время $\tau_{1/2}$ сильно зависит и от r , что и дает резкий обрыв в распределении частиц по размерам. Так, при $D_s \approx 10^{-16}$ см²/с $\tau_{1/2}$ будет около 10^3 лет для радиуса кривизны 1000 ангстрем и около 10^7 лет для $r = 1$ мкм.

Можно ли шагать по лунному грунту? Этот вопрос весьма интересовал исследователей перед первыми полетами на Луну. Сейчас, когда мы знаем ответ, он кажется банальным. А до посадки космических аппаратов высказывались предположения, что, поскольку лунный грунт сильно измельчен микрометеоритной бомбардировкой, он может оказаться слишком рыхлым, и космический аппарат и астронавты будут проваливаться в него. Нужно было знать, достаточна ли прочность лунного грунта. Прочность грунта определяется

сцеплением между частицами, т. е. свойствами межчастичных контактов, о которых говорилось выше. Ее можно оценить как $\sigma_p \approx \alpha/R$. В эту оценку не вошли механические характеристики материала частиц, а только характеристики контакта. Для лунного реголита, где $\alpha \approx 10^3$ эрг/см², $R = 10^{-3} - 10^{-2}$ см, прочность оказывается порядка $10^5 - 10^6$ дин/см², что совпадает с результатами натурных и лабораторных измерений [21]. Таким образом, лунный грунт прочнее аналогичного земного; он не мог представлять опасности для астронавтов. Следует, однако, отметить, что измерения и оценки α для твердых тел начали проводиться в 1970-80 г.г. Так что к моменту запуска КА на Луну эти результаты не могли стать достоянием инженеров и геологов.

Легко ли поднять пыль на Луне? Прочность отдельных контактов между частицами и грунта в целом определяют не только технологические характеристики грунта, но и все явления, связанные с отрывом и выбросом частиц: перенос пыли вдоль поверхности Луны, а также потерю пылеобразного вещества в ударных процессах и даже формирование слоя реголита.

При образовании кратера остановка роста его размеров происходит, когда давление кратерообразующего течения станет меньше прочности грунта. Скорость вещества, выбрасываемого с краев таких кратеров (они называются прочностными), равна [22]: $v_{\min} \approx (\sigma_p/\rho)^{1/2}/2$, где σ_p и ρ – прочность и плотность материала поверхности. На краях кратера скорость выбросов минимальна (с чем и связано обозначение v_{\min}); с приближением к центру она возрастает по закону $1/r^3$ [23]. Доля выбросов, покидающих небесное тело, равна v_{\min}/v_e , где v_e – скорость убегания.

Как видно из формулы для v_{\min} , наибольшей скоростью обладают выбросы из сплошного твердого материала, обладающего наиболее высокой прочностью, – например, из микрократеров на поверхности частиц грунта. Для таких выбросов $v_{\min} \sim 100$ м/с, для кратеров в реголите $v_{\min} = 5 - 10$ м/с, т. е. даже для небольших астероидов (≤ 50 км) значительная часть их выбросов может возвращаться на поверхность небесного тела. Это способствует образованию слоя мелкого реголита на астероидах, в наличии которого длительное время сомневались, полагая, что все кратерные выбросы покидают малые астероиды.

Недостаток знаний о прочности порошкообразной среды породил некоторые заблуждения. Так, рассматривая кратерообразование на астероидах, полагают, что оно происходит в так называемом гравитационном режиме, то есть рост размера кратера останавливают силы гравитации. При этом прочностью реголита пренебрегают, полагая ее нулевой. Поскольку гравитация на астероидах мала, расчетные размеры кратеров получаются завышенными. Другое распространенное заблуждение состоит в переоценке роли силы тяжести как препятствия к подъему пыли под действием сейсмических или электрических сил. Легко показать, что для реголитовых частиц характерных размеров ($\sim 10 - 100$ микрон) их весом можно пренебречь по сравнению с капиллярными силами, прижимающими их к поверхности. В работе (Старухина, 2005) впервые сформулированы ограничения на электрический потенциал поверхности ϕ , с которой могут подниматься заряженные пылинки. Для пылинки размера r , поднимающейся с поверхности такой же частицы, $\phi > (F_c)^{1/2} = (2\pi r \Delta\alpha)^{1/2}$ единиц СГСЭ (1 единица СГСЭ = 300 вольт). Это означает, что при потенциалах в несколько вольт, которые по некоторым расчетам достигаются на освещенной стороне Луны, даже субмикронные пылевые частицы не могут подняться с поверхности. Это может происходить только на ночной стороне с потенциалами несколько десятков вольт. Поднятие мелкой пыли имеет отношение к проблеме свечения, наблюдавшегося в зоне лунного терминатора астронавтами.

Свирлы на Луне и Меркурии: модель образования

Свирлы (от английского «swirl» – завиток) на поверхности Луны и Меркурия – это образования размером до десятков и сотен километров, не связанные с рельефом (точнее, наложенные на местный рельеф) и выделяющиеся только оптическими характеристиками: альбедо, показателями цвета, наклоном фазовых кривых (Kreslavsky and Shkuratov, 2003), поляриметрическими параметрами (Shkuratov and Opanasenko, 1992), которые указывают на меньшую степень зрелости (Shkuratov et al., 2003a,b) [24-26] и отличие структуры поверхности свирлов. Свирлы имеют сложную форму, включающую изгибы и вихреобразные узоры (рис. 2.8.4), а увеличение оптического разрешения изображений усложняет картину, выявляя такие структуры все меньших масштабов (< 50 м).

Кроме оптических аномалий, в области свирлов были обнаружены магнитные особен-

ности [27, 28]. С космических аппаратов, пролетавших над лунной поверхностью на высотах 100, 33 и 18 км, над областями свирлов были зафиксированы магнитные поля сложной конфигурации величиной до десятков γ ($1\gamma = 1$ нанотесла). По мере снижения орбит, с которых проводились измерения, возрастала сложность структуры и величина магнитных полей. Таким образом, механизм образования свирлов должен объяснить сочетание наблюдаемых оптических и магнитных аномалий.

Гипотезы о происхождении свирлов были всесторонне проанализированы в работе (Starukhina and Shkuratov, 2004). Эти гипотезы можно представить в виде нескольких групп. Авторы «антиподальных» механизмов полагают, что низкая зрелость грунта, приводящая к наблюдаемым оптическим характеристикам свирлов, является результатом отклонения протонов солнечного ветра магнитными аномалиями [29], а сами магнитные аномалии – следствием фокусировки различных видов волн, огибающих поверхность планеты при крупном ударном событии в антиподальной области (см. ссылки в [27]). Обсуждались три механизма антиподального намагничивания: (1) сжатие и усиление межпланетного магнитного поля расширяющейся плазмой, образовавшейся при высокоскоростном ударе [30]; (2) ударное намагничивание пород при фокусировке сейсмической волны; (3) ударное намагничивание выбросами из антиподального кратера.

Эта группа гипотез уязвима в отношении как оптических, так и магнитных свойств свирлов. Как показано в работе [31], для отклонения значительной части протонов солнечного ветра магнитное поле на поверхности свирлов должно превосходить 1000γ , в то время как максимальные значения, измеренные на лунной поверхности экспедициями «Аполлон», составляют 300γ . Кроме того, протоны накапливаются в грунте столь быстро (примерно за 100 лет (Starukhina and Shkuratov, 2004)) по сравнению со временем экспозиции частиц (≈ 150 тысяч лет [32]), что уменьшение их потока даже на три порядка не снизит их концентрацию в поверхностных слоях реголитовых частиц. Более того, согласно некоторым оценкам концентрация водорода в области свирла Рейнер-гамма повышена по сравнению с окружающими районами.

Наиболее существенный аргумент против механизма магнитного экранирования – то, что протоны вообще не являются необходимыми для созревания грунта. Это следует из термодинамических соотношений [33], согласно которым отсутствие кислорода, характерное для безатмосферных тел, является достаточным условием для восстановления железа при нагревании вещества до ≈ 1000 К, которое имеет место при метеоритных ударах. Это соображение подтверждается лабораторными экспериментами, имитировавшими разогрев, плавление и испарение, происходящими при микрометеоритной бомбардировке. В опытах по лазерному облучению пироксена, оливина и других силикатных минералов, имеющих на лунной поверхности [34, 35], а также по субсолидусному (т. е. при температуре ниже точки плавления) восстановлению железа в пироксене, оливине [36], было получено потемнение и покраснение образцов, а также обнаружено образование наночастиц железа вблизи поверхностей частиц, характерные для зрелого грунта.

Наконец, самому известному из свирлов – образованию Рейнер-гамма – не соответствует никакой крупный кратер или ударный бассейн на противоположной стороне Луны (в антиподальной области), что требует разработки иных механизмов как намагничивания, так и формирования оптических свойств свирлов.

Другая группа гипотез связывает происхождение свирлов с прохождением сквозь лунный реголит (или вдоль него) газов кометной комы [37, 24-26]. Предполагалось, что прохождение кометной комы создает «ветер», который может поднять пыль, обнажая незрелый грунт. При этом ядро кометы должно было бы пройти по касательной вблизи поверхности планеты. В противном случае в области свирла находился бы крупный кратер, а расширение ударного пара оказало бы давление на реголит большее, чем давление газов комы, и стерло бы результат прохождения комы, если бы таковой имел место (Starukhina and Shkuratov, 2004). Однако даже предельно возможные давления газов комы $p = n_c \mu v^2 \approx 10^4$ дин/см² ($\mu = 3 \cdot 10^{-23}$ г – масса молекул воды), которые реализуются вблизи поверхности ядра, где плотность комы $n_c \approx 8 \cdot 10^{12}$ см⁻³ максимальна, при маловероятном сочетании экстремальных значений параметров прохождения кометы (на расстоянии около половины радиуса ядра со скоростью $v = 70$ км/с), не могут преодолеть силу слипания между реголитовыми частицами и поднять пыль (Старухина, 2000, Starukhina and Shkuratov, 2004).

При помощи кометной гипотезы делались также попытки понять происхождение

магнитных аномалий. Обычно их объясняют ударным намагничиванием пород при столкновении кометного ядра с поверхностью планеты в индуцированном магнитном поле кометы, сжатом с приближением ее к поверхности. От первоначальных значений 40–80 нТ поле при этом должно было увеличиться до 0,01–1 э, необходимых для получения остаточной намагниченности, измеренной для лунных пород. Однако эта модель недостаточно разработана количественно; кроме того, сжатие и усиление имеет место и для межпланетного магнитного поля вокруг метеоритных ударов, но отнюдь не все крупные молодые кратеры окружены магнитными аномалиями.

Модель образования свирлов, способная объяснить их наблюдаемые свойства, разработана в Харьковской обсерватории (Starukhina and Shkuratov, 2004, Starukhina, 2006, 2007). В этой модели предполагается, что свирл – это след падения метеорного роя – остатков кометного ядра или астероида, распавшегося незадолго до столкновения с поверхностью Луны или Меркурия. Такой метеорный рой «вспахивает» область падения, не оставляя заметных кратеров и обнажая незрелый грунт. Практически одновременное падение большого числа ударников поднимает огромное количество частиц пылевых выбросов из мелких кратеров, целиком лежащих в реголитовом слое. До того как осесть на поверхность, пылинки испытывают сотни столкновений между собой, то есть образуют среду, подобную газу, которую можно характеризовать кинематической вязкостью. Струи выбросов в таком «газе» могут иметь большие числа Рейнольдса и сопровождаться вихревыми потоками пылевых частиц, которые, оседая на поверхность, образуют вихревые структуры, характерные для свирлов.

В месте падения метеорного роя следует ожидать также магнитную аномалию (Старухина, 2006, 2007). Намагничивание поверхности будет происходить в сильном магнитном поле, возникающем за счет сжатия внешнего магнитного поля (межпланетного, как на Луне, или дипольного, как на Меркурии) одновременно расширяющимися облаками ударной плазмы. Расчеты зависимости магнитной индукции от высоты для такого намагничивания уже при умеренных значениях параметров модели дали хорошее совпадение с величинами поля, измеренными с орбит.

Поиск воды на безатмосферных телах

Поиски воды на безатмосферных космических телах представляют интерес как для понимания состава и эволюции этих тел, так и для осуществления длительных космических экспедиций. В 1998 году было объявлено об обнаружении воды на Луне [39], а несколькими годами ранее – на Меркурии [40] и на астероидах [41]. Однако все это были свидетельства, полученные в косвенных экспериментах. Рассмотрим, в какой мере можно доверять интерпретации результатов этих экспериментов и что могло привести к таким результатам (Starukhina, 2001).

Поиск других интерпретаций экспериментов по обнаружению воды на безатмосферных телах был связан с двумя обстоятельствами. Во-первых, необходимо было найти источники воды. Даже для астероидов тех типов, которые предположительно являются родительскими телами метеоритов, содержащих воду, связанную в гидросиликатах, эта проблема не проста, поскольку при метеоритной бомбардировке происходит разогрев поверхности до температур, заведомо превосходящих температуру дегидратации. Однако «воду» неожиданно обнаружили даже на нескольких астероидах, сложенных безводными силикатами (S и E типов), и даже M типа. Предполагается, что вода могла появиться на таких телах в результате столкновений с кометами, имеющими ледяные ядра [42–44].

Это могло произойти следующим образом. Часть испарившихся молекул, скорость которых превышала скорость убегания, покинула небесное тело, а «медленные» молекулы совершали хаотические баллистические прыжки («испарение-конденсация») по поверхности, пока не попадали в холодные ловушки, откуда уже не могли испариться. При этом неявно предполагалось, что лед будет покрыт кратерными выбросами быстрее, чем успеет улетучиться за счет испарения при микрометеоритных ударах.

Но главная проблема – это летучесть льда: в космическом вакууме он быстро испаряется. Давление насыщенных паров и скорость испарения экспоненциально зависят от температуры. Так, метровый слой льда может сохраняться в течение миллиарда лет лишь в областях, где температура никогда не превышала 100 К. Это постоянно затененные кратеры, которые занимают лишь часть приполярных районов Луны и Меркурия. Однако даже в таких кратерах вещество время от времени разогревается от метеоритных ударов меньших

масштабов. Между тем, если верить данным КА «Лунар Проспектор», «льдом» на Луне и Меркурии должны быть покрыты или обогащены не только полярные шапки, но и значительные площади в экваториальных районах, где температура может превышать 350 К.

Дело в том, что в настоящее время нет прямых свидетельств наличия воды на безатмосферных телах. Есть три типа наблюдений, нацеленных на поиски льда. Все они являются косвенными. Такие наблюдения допускают двоякую интерпретацию. Эти наблюдения и интерпретации сведены в таблице 1. Рассмотрим интерпретацию каждого из типов наблюдений.

Таблица 1

Три дистанционных метода обнаружения водяного льда на безатмосферных космических телах: альтернативная интерпретация результатов

Имплантация протонов солнечного ветра. Наиболее очевидным эффектом солнечного ветра является ионная имплантация – накопление атомов налетающих ионов (их заряд компенсируется потоком электронов) на средней глубине проникновения ионов. Очевидно, что такое накопление не может продолжаться бесконечно; по достижении насыщения оно сменяется десорбцией. Концентрация насыщения имплантированных атомов примерно равна половине концентрации атомов в частице-мишени $n_0 \approx 10^{23} \text{ см}^{-3}$. В отсутствие десорбции она достигается за геологически малые времена: $\tau_s \approx 0,5 n_0 h / j \approx 10^{10} \text{ с} \approx 300 \text{ лет}$, где $j = 0,6 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ – средний поток солнечного ветра на поверхность вращающегося тела вблизи орбиты Земли, $h \approx 1000$ ангстрем – толщина имплантированного слоя. В полярных областях Луны время насыщения на два порядка больше, однако оно остается в несколько раз меньшим среднего времени экспозиции частицы грунта на лунной поверхности 150 тыс. лет [32].

Если бы в конце пробега протонов образовывались нейтральные атомы водорода, то из-за своей высокой подвижности они не могли бы накапливаться в частице-мишени до концентраций, превышающих растворимость в ней водорода. Растворимость газов в силикатах очень мала. Однако концентрация водорода и других атомов солнечного ветра в лунном грунте на много порядков превышает равновесную. (Интересно, что никто не удивился этому обстоятельству. Видимо, данные о растворимости газов в силикатах не были известны химикам, анализировавшим лунные образцы.)

Повышенное содержание имплантированных газов обеспечивается захватом атомов в ловушках, которыми являются радиационные дефекты. Это может быть как физический захват в потенциальную яму вблизи дефекта, так и химический захват – насыщение нарушенных химических связей в частице-мишени. В мишенях, содержащих кислород, при облучении протонами могут образовываться гидроксильные группы OH. Образование гидроксидов наблюдалось при моделировании действия солнечных космических лучей на силикатные стекла [45], а также в многочисленных экспериментах по имплантации водорода в оксиды. Различные оксиды (SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2) облучались ядрами водорода или дейтерия в широком диапазоне энергий [46–48]. При этом в максимуме профиля имплантации от 50% до 100% атомов кислорода мишени оказываются связанными в группы OH (или OD).

Такие группы, как и атомы в ловушках, значительно менее подвижны, чем атомы водорода, свободно перемещающиеся между ионами в кристалле или стекле. После прекращения облучения освобождаются лишь мелкие ловушки, а более глубокие продолжают удерживать атомы. Этим объясняется повышенное содержание газов в лунном грунте, которое в среднем лишь на порядок меньше по сравнению с насыщением.

Способность ловушки удерживать атомы пропорциональна $\exp(-U_c/kT)$, где T – температура, U_c – энергия связи (глубина ловушки). Она может составлять от нескольких

десятих до нескольких электронвольт ($1\text{эВ} = 1,6 \cdot 10^{-12}$ эрг). Так, для атомов Н в гидроксильных группах ОН в облученном SiO_2 $U_c \approx 0,8$ эВ. Именно экспоненциальная зависимость подвижности атомов от T и U_c определяет наблюдаемые региональные вариации содержания водорода в лунном грунте. Зависимость от T определяет широтный тренд содержания водорода. Зависимость глубины ловушек U_c от материала поверхности делает возможными как пониженное содержание Н в некоторых кратерах полярных областей, так и «пятна» высокой концентрации Н в низкоширотных районах, наблюдавшиеся КА «Лунар Проспектор».

Единственным местом на Луне, где обнаружена действительно большая величина концентрации водорода $[\text{H}] = 1700 \text{ ppm} = 0,17 \text{ вес.}\%$, является постоянно затененные кратеры Шумейкера и Фаустини с предполагаемой постоянной температурой 100 К [49]. Эта концентрация на порядок превосходит $[\text{H}]$ в других полярных кратерах, где температура значительно превышает 100 К. Однако даже столь большая величина $[\text{H}]$ в принципе может быть объяснена имплантацией протонов солнечного ветра. Покажем это.

Массовая доля имплантированного водорода в грунте с удельной поверхностью S (площадь на единицу массы) равна $[\text{H}] = S m_p n_s = 6\xi m_p c n_0 h / \rho l$, где m_p – масса протона, $n_s = c n_0 h$ – число внедренных атомов на единицу поверхности реголитовой частицы, c – их доля в имплантированном слое толщины h . Типичное значение n_s при насыщении, достигаемом в лабораторных экспериментах, $n_s = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ [50]. Однако при космическом облучении эта величина может быть в несколько раз больше. Этому способствуют два фактора.

Во-первых, расширение профиля имплантации со временем. Дозы облучения солнечным ветром даже в полярных кратерах могут быть выше, чем в лабораториях, так что максимальные c будут достигаться в более широкой области профиля имплантации. Облучение происходит медленнее, поэтому внедренные ионы успевают диффундировать вглубь частиц. Измерение зависимости $[\text{H}]$ от глубины в частицах лунного грунта [51] показало, что максимумы профилей $[\text{H}]$ смещены до 1000 ангстрем вглубь, а ширина профилей составляет несколько тысяч ангстрем (т. е. на порядок больше средней ширины профилей протонов с энергией 1 кэВ в лабораторных экспериментах). Другая возможность увеличения n_s имеется для грунта полярных районов, где низкая температура частиц может воспрепятствовать десорбции имплантированных атомов настолько, что на глубине имплантации образуются газовые пузырьки, называемые блистерами.

Измеренные значения удельной поверхности лунного реголита S лежат в интервале от $800 \text{ см}^2/\text{г}$ [52] до $5000 \text{ см}^2/\text{г}$ [53]. Заметим, что удельная поверхность грунта связана со средними характеристиками частиц $S = 6\xi/\rho l$, где $\rho \approx 3 \text{ г/см}^3$ – плотность частиц грунта и l – их средний размер, ξ – фактор шероховатости (отношение площади поверхности частицы к площади сферы того же диаметра).

Учет этих обстоятельств показывает, что в лунном грунте могут быть достигнуты концентрации имплантированного водорода даже в несколько раз большие, чем максимальная концентрация 0,17 вес.%, измеренная нейтронным спектрометром КА «Лунар Проспектор».

Химическое связывание протонов солнечного ветра и инфракрасная спектроскопия астероидов. Поиски воды на астероидах проводились спектроскопическим методом. Молекулы воды дают несколько колебательных полос поглощения: около 6 мкм и несколько полос в интервале 2,7 – 3,1 микрон. Достаточно сильны их обертоны – 1,4 и 1,9 мкм. Из них только полосы 6, 1,9 и $\approx 3,03$ мкм соответствуют колебаниям, где участвует молекула H_2O как целое, – остальные полосы вблизи 3 мкм формируются колебаниями только гидроксильных групп ОН. Полосу 6 мкм трудно выделить на фоне теплового излучения, полоса 1,9 мкм при малом содержании воды довольно слабая, поэтому поиски воды или гидросиликатов велись в полосе около 3 мкм [54, 41].

Однако поглощение в этой полосе нельзя интерпретировать однозначно, особенно при низком спектральном разрешении. Во-первых, невозможно отличить молекулы H_2O от гидроксильных групп ОН. Более того, невозможно отличить гидратированные силикаты от безводных (и даже силикаты от других оксидов), так как группы ОН, как обсуждалось выше, могут быть результатом имплантации протонов солнечного ветра.

Можно ли обнаружить группы ОН радиационного происхождения при дистанционном зондировании безатмосферных тел? Достаточно ли их, чтобы повлиять на спектры отражения? Оказывается, да, – что подтвердили расчеты (Старухина, 1999, 2001) на основе модели (Старухина и Шкуратов, 1996). Физическая причина этого та же, что и изменения спектров порошков тонкими пленками сильно поглощающих веществ на поверхностях

прозрачных частиц. Приращение оптической толщины частицы грунта, окруженной каймой имплантированного слоя толщины h , равно: $\Delta\tau = 2\alpha n_s h = 2\alpha n_s$, где $\alpha = 3 \cdot 10^{-19} \text{ см}^2$ – эффективность поглотителя (коэффициент поглощения на единицу объемной концентрации), а множитель 2 соответствует двукратному прохождению луча через кайму частицы между двумя рассеяниями на ее поверхности. При $n_s = 10^{17} \text{ см}^{-2}$ (см. выше) $\Delta\tau = 0,3$. Это значительная добавка к оптической плотности частиц. Для сравнения: силикатные частицы, составляющие материковые и морские районы Луны, при $\lambda = 2,6 \text{ мкм}$ имеют альбедо $A = 0,35$ и $0,17$ и $\tau = 0,085$ и $0,25$, а добавка $\Delta\tau = 0,3$ снижает альбедо до $0,12$ и $0,084$, соответственно.

Лед или холодные силикаты? О льде на полюсах Меркурия и Луны было объявлено после обнаружения их большой яркости в радиодиапазоне, а также большой «деполяризованной» компоненты отраженного сигнала. Все это указывало на значительный вклад в отраженный сигнал многократно рассеянных волн. На Земле такие характеристики отраженных радиоволн наблюдаются только на территориях, покрытых льдом. Отсюда был сделан вывод о присутствии льда у полюсов Меркурия и Луны.

На самом деле многократное рассеяние радиоволн свидетельствует лишь о низком коэффициенте их поглощения в рассеивающей среде. Коэффициент поглощения радиоволн диэлектриками уменьшается с температурой, и в постоянно затененных полярных областях Меркурия и Луны поглощение силикатами может снизиться до поглощения, характерного для льда. На Земле, обладающей атмосферой, высокое отражение радиоволн силикатами не может проявиться, во-первых, потому что достаточно низкие температуры не достигаются, во-вторых, все холодные области на Земле покрыты толщами льда.

Отсутствие измерений поглощения радиоволн при низких температурах позволяет подтвердить этот вывод лишь косвенно, путем экстраполяции измеренных температурных зависимостей поглощения для силикатов на низкие температуры (Starukhina, 2000, 2001).

Интерпретация высокой радиояркости полюсов Меркурия как «холодных силикатов» находится в соответствии с наблюдением радиоярких пятен в его низкоширотных зонах, где дневные температуры около 600°C , и такие пятна никак нельзя приписать воде. Поглощение радиоволн различными силикатами может варьировать в широких пределах и может быть достаточно низким даже при высоких температурах, что объясняет локальные вариации радиояркости. Ее глобальный ход, как и в случае с десорбцией имплантированных газов, определяется глобальным ходом температуры.

Распределение имплантированных газов по лунной поверхности

Изложенные выше соображения о глобальном (широтном) ходе распределения содержания водорода можно применить и к другим имплантированным газам, например, к изотопу гелия – ^3He , который является потенциальным энергоносителем будущего [55]. В связи с возможной добычей ^3He на Луне она была названа «Персидским заливом XXI века» [56].

Как и в случае водорода, рассматривались два фактора, которые могли бы влиять на концентрацию имплантированных атомов в лунном грунте: накопление и десорбция. В работе [57] по картографированию содержания гелия в лунном грунте учитывался лишь первый фактор. Средний поток солнечного ветра уменьшается с широтой ϕ по закону $\cos\phi$. Однако, как указано в работах (Шкуратов и др., 1999, Starukhina, 2006), определяющим фактором является не скорость накопления, а скорость дегазации. Медленная дегазация компенсирует падение потока с широтой: имплантированные атомы оказываются «вмороженными» в частицы грунта.

Кроме сказанного выше, в пользу этого свидетельствует тот факт, что измеренные концентрации имплантированных газов в лунном грунте отличаются от их концентраций в солнечном ветре (см. таблицу 2): чем меньше скорость диффузии и десорбции атомов, тем больше их доля возрастает по сравнению с долей в солнечном ветре.

Таблица 2.

Типичные доли атомов в солнечном ветре
и в лунном грунте (оценки по данным [58])

Сказанное в предыдущем параграфе об имплантированных газах относится и к гелию, а именно: (1) глобальный ход концентрации гелия контролируется температурой, и, следовательно, нужно ожидать возрастания [He] с широтой; (2) возможны локальные вариации [He], вызванные присутствием минералов, связывающих гелий в глубокие ловушки.

Захват атомов гелия – нетривиальный факт, поскольку они не могут связываться химически, а в силу малых размеров являются самыми подвижными из всех имплантированных атомов. Более эффективные ловушки для гелия содержат минералы с относительно высокой проводимостью – например, ильменит FeTiO_3 [59,60]. Поверхностный слой таких минералов не аморфизуется при бомбардировке солнечным ветром, а радиационные дефекты, образующиеся на фоне сохранившейся кристаллической структуры, связывают внедренные атомы гелия значительно сильнее, чем менее выраженные дефекты аморфной ионной сетки. Энергия связи гелия в таких ловушках-вакансиях порядка одного электрон-вольта и более, так что температура лунной поверхности даже на экваторе слишком низка для их термического освобождения. Очевидно, что для наличия большого числа радиационных дефектов необходима достаточная степень зрелости грунта, поэтому наблюдаемое содержание гелия коррелирует со зрелостью (см. раздел 2.1).

Отметим также, что типичные энергии связи имплантированных атомов в ловушках выше теплот испарения молекул летучих веществ (таких как H_2O , CO_2 и др.), поэтому температуры полярных районов Луны более благоприятны для накопления имплантированных газов, чем летучих веществ. Поэтому, если мы предполагаем присутствие в грунте замороженных летучих веществ, то там тем более следует ожидать повышенного содержания «вмороженных» имплантированных атомов.

Поскольку содержание имплантированных газов солнечного ветра в лунном грунте определяется скоростью дегазации, то наиболее перспективными для добычи таких газов являются полярные районы, особенно постоянно затененные кратеры, где предпочтительно отбирать зрелый грунт с высоким содержанием ильменита. Может быть, кратеры Шумейкер и Фаустини и есть будущий «Персидский залив»?

Таким образом, использование опыта, накопленного в области физики конденсированного состояния, может быть весьма полезным в планетной физике; он позволяет по-новому взглянуть на устоявшуюся интерпретацию некоторых результатов дистанционного зондирования Луны и планет.

Литература

1. *Wright R. B., Varma R., Gruen D. M.* Raman scattering and SEM studies of graphite and silicon carbide surface bombarded with protons, deuterons and helium ions. // *J. Nucl. Mater.* – 1976. – V. 63. – P. 415-421.
2. *Bibring J.-P.* Effets d'implantation du vent solaire dans les grains lunaires et extrapolations astrophysiques. These. Orsay, 1978. – 184 p.
3. *Roessler K., Eich G., Patnaik A., Zador E.* Polycyclic aromatic hydrocarbons via multicenter reactions induced by solar radiation // *LPSC XXI*, Houston TX: LPI. – 1990. – P.1035-1036.
4. *Hartmann W. K., Binzel R. P., Tholen D. J., Cruikshank D. P., Goguen J.* Trojan and Hilda asteroid lightcurves. I. Anomalous elongated shapes among Trojans (and Hildas?) // *Icarus.* – 1988. – V. 73. – P. 497-498.
5. *Dahlgren M., Lahulla J. F., Lagerkvist C.-I.* A study of Hilda asteroids. VI. Analysis of the lightcurve properties // *Icarus.* – 1999. – V. 138. – P. 259-266.

6. *Рот И.* Химическое распыление // Распыление твердых тел ионной бомбардировкой. Вып. 2. – М.: Мир, 1986. – С. 134-204.
7. *Philipps V., Vietzke E.* Reactions of thermal hydrogen atoms and energetic hydrogen and oxygen ions with pyrolytic graphite // Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Astrophysics / Eds.: Leger A., d'Hendecourt L., Boccara N. – NATO ASI Series, Ser.C. – 1986. – V. 191. – P. 95-98.
8. *Leger A., and d'Hendecourt L.* Identification of PAHs in astronomical IR spectra - implications // Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Astrophysics / Eds.: Leger A., d'Hendecourt L., Boccara N. – NATO ASI Series, Ser.C. – 1986. – V. 191. – P. 223-253.
9. *Пронин А. А., Николаева О. В.* Темные гало вокруг кратеров на Фобосе и ударное преобразование углистых хондритов // Докл. АН СССР. – 1982. – Т. 265. – С. 429.
10. *Pang K., Pollack J. D., Veverka J. et al.* The composition of Phobos: Evidence for carbonaceous chondrite surface spectral analysis // Science. – 1978. – V. 199. – P. 64-66.
11. *Ксанфомалити Л. В., Мороз В., Мерчи С., Брумт Д. и др.* (15 соавторов). Физические свойства реголита Фобоса // Космические исследования. – 1991. – Т. 29, вып. 4. – С. 621-646.
12. *Zellner B., Wells E. N.* Spectrophotometry of Martian satellites with the Hubble space telescope // LPSC XXV. Houston TX: LPI. – 1994. – P. 1541-1542.
13. *Виноградов Ф. П., Нефедов В. И., Урусов В. С. и др.* Рентгеноэлектронное исследование лунного реголита из Морей Изобилия и Спокойствия // Докл. АН СССР. – 1971. – Т. 201. – С. 957-960.
14. *Housley R., Grant R., Paton N. E.* Origin and characteristics of excess Fe metal in lunar glass welded aggregates // Proc. Lunar Sci. Conf. 4th. Houston TX: LPI. – 1973. – P. 2737- 2749.
15. *Gradie J., Veverka J.* The composition of the Trojan asteroids // Nature. – 1980. – V. 283. P. 840-842.
16. *King T.V.* Contribution towards a quantitative understanding of reflectance spectroscopy: phyllosilicates, olivine, and shocked materials. Ph. D. Thesis. Univ. of Hawaii. – 1986.
17. *Moroz L. V., Pieters C. M., Akhmatova M. V.* Spectroscopy of solid carbonaceous materials: Implications for dark surfaces of outer belt asteroids // LPSC XXII, Houston TX: LPI. – 1991. – P. 925-926.
18. *Родэ О. Д., Иванов А. В., Назаров М. А. и др.* Атлас микрофотографий поверхности частиц лунного реголита. – Прага: Академия, 1979. – 235 с.
19. *Стахеев Ю. И., Вульфсон В. К., Иванов А. В., Флоренский К. П.* Гранулометрические характеристики лунного грунта из моря Изобилия // Лунный грунт из моря Изобилия. – М.: Наука, 1974. – С. 44-49.
20. *Гегузин Я. Е., Кагановский Ю. С.* Диффузионные процессы на поверхности кристалла. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 124 с.
21. *Черкасов И. И., Шварев В. В.* Грунтоведение Луны. – М.: Наука, 1979. – 232 с.
22. *Ivanov B. A.* The effect of gravity on crater formation: thickness of ejecta and concentric basins // Proc. Lunar Sci. Conf. 7th. Houston TX: LPI – 1976. – P. 2947-2965.
23. *Melosh H. D.* Impact cratering: A geologic process. N.Y.: Oxford Univ. Press. – 1989. (Перевод: Мелosh Г. Образование ударных кратеров. Геологический процесс. – М.: Мир, 1994. – 335 с.)
24. *Bell J. F. Hawke B. R.* Recent comet impacts on the Moon: the evidence from remote-sensing studies // Publ. Astron.Soc. Pac. – 1987. – V. 99. – P. 862-867.
25. *Shevchenko V. V., Pinet P. C., Chevrel S. D.* Remote sensing studies of immature lunar soils (Reiner-Gamma Formation). Sol. Syst. Res. – 1993. – V. 27. – P. 310-321.
26. *Pinet P., Shevchenko V., Chevrel S., Daydou Y., Rosemberg C.* Local and regional lunar regolith characteristics at Reiner Gamma formation: Optical and spectroscopic properties from Clementine and Earth-based data // J. Geophys. Res. – 2000. – V. 105. – P. 9457-9475.
27. *Lin R. P., Mitchell D. L., Curtis D. W., Anderson K. A., Carlson C. W., McFadden J. , Acuña M. H., Hood L. L., Binder A. A.* Lunar surface magnetic fields and their interaction with the solar wind: results from Lunar Prospector// Science. – 1998. – V. 281. – P. 1480-1484.
28. *Hood L. L., Zakharian A., Halekas J., Mitchell D. L., Lin R. P., Acuña M. H., Binder A. B.* Initial mapping and interpretation of lunar crustal magnetic anomalies using Lunar Prospector magnetometer data // J. Geophys. Res. – 2001. – V. 106. – P. 27825-27833 (2000JE001366).
29. *Hood L., Schubert G.* Lunar magnetic anomalies and surface optical properties // Science. – 1980. – V. 208. – P. 49-51.

30. Hood L. L., Huang Z. Formation of magnetic anomalies antipodal to lunar impact basins: Two-dimensional model calculation // J. Geophys. Res. – 1991. – V. 96. – P. 9837-9846.
31. Hood L., Williams C. The lunar swirls: Distribution and possible origins // Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 20th. Houston TX: LPI. – 1989. – P. 99-113.
32. Borg J., Comstick G. M., Langevin Y., Maurette M., Jouffrey B., Jouret C. A Monte-Carlo model for the exposure history of lunar dust grains in the ancient solar wind // Earth Planet. Sci. Lett. – 1976. – V. 29. – P. 161-174.
33. O'Neill H. St. C. Systems Fe-O and Cu-O: Thermodynamic data for the equilibria Fe-“FeO”, Fe-Fe₃O₄, “FeO”-Fe₃O₄, Fe₃O₄-Fe₂O₃, Cu-Cu₂O, and Cu₂O-CuO from emf measurements // American Mineralogist. – 1988. – V. 73. – P. 470-486.
34. Moroz L. V., Fisenko A. V., Semjonova L. F., Pieters C. M., Korotaeva N. N. Optical effects of regolith processes on S-asteroids as simulated by laser shots on ordinary chondrite and other mafic materials // Icarus. – 1996. – V. 122. – P. 366-382.
35. Sasaki S., Nakamura K., Hamabe Y., Kurahashi E., Hiroi T. Production of iron nanoparticles by laser irradiation in simulation of lunar-like space weathering // Nature. – 2001. – V. 410, N 6828. – P. 555-557.
36. Britt D. T. The spectral effects of subsolidus reduction of olivine and pyroxene // Lunar and Planetary Science XXIV. Houston TX: LPI. – 1993. – P. 195-196.
37. Schultz P., Srnka L. J. Cometary collisions on the Moon and Mercury // Nature. – 1980. – V. 284. P. 22-26.
38. Gold T., Soter S. Cometary impact and the magnetization of the Moon // Planet. Space Sci. – 1976. – V. 24. – P. 45-54.
39. Feldman W. C., Maurice S., Binder A. B., Barraclough B. L., Elphic R. C., Lawrence D. J. Fluxes of fast and epithermal neutrons from Lunar Prospector: evidence for water ice at the lunar poles // Science. – 1998. – V. 281. – P. 1496-1500.
40. Butler B. J., Muhleman D. O. Mercury: Full-disk radar images and the detection and stability of ice at the north pole // J. Geoph. Res. – 1993. – V. 98. – P. 15003-15023.
41. Rivkin A. S., Howell E. S., Britt D. T., Lebovsky L. A., Nolan M. C., Branstor D. D. 3 μ m photometric survey of M- and E-class asteroids // Icarus. – 1995. – V. 117. – P. 90-100.
42. Watson K., Murray B. C., Brown H. The behavior of volatiles on the lunar surface // J. Geoph. Res. – 1961. – V. 66. – P. 3033-3045.
43. Arnold J. R. Ice I the lunar polar regions // J. Geoph. Res. – 1979. – V. 84. – P. 5659-5668.
44. Butler B. J. The migration of volatiles on the surfaces of Mercury and the Moon // J. Geoph. Res. – 1997. – V. 102. – P. 19283-19291.
45. Zeller E. J., Ronca L. B., Levy P. W. Proton-induced hydroxyl formation on the lunar surface // J. Geophys. Res. – 1966. – V. 71. – P. 4855-4860.
46. Mattern P. L., Thomas G. J., Bauer W. Hydrogen and helium implantation in vitreous silica. // J. Vac. Sci. Technol. – 1976. – V. 13, No 1. – P. 430-436.
47. Gruen D. M., Siskind B., Wright R. B. Chemical implantation, isotopic trapping effects, and induced hydroscopicity resulting from 15 keV ion bombardment of sapphire. // J. Chem. Phys. – 1976. – V. 65, No 1. – P. 363-378.
48. Siskind B., Gruen D. M., Varma K. Chemical implantation of 10 keV H⁺ and D⁺ in rutile. // J. Vac. Sci. Technol. – 1977. – V. 14, No 1. – P. 537-542.
49. Feldman W. C., Maurice S., Lawrence D. J. et al. Evidence for water ice near the lunar poles // J. Geophys. Res. – 2001. – V. 106 (E10). P. 23231-23251.
50. Lord H. C. Hydrogen and helium implantation into olivine and enstatite: Retention coefficients, saturation concentrations, and temperature-release profiles // J. Geoph. Res. – 1968. – V. 73. – P. 5271-5280.
51. Leich D. A., Tombrello T. A., Burnett D. S. The depth of distribution of hydrogen in lunar material // Lunar Planet. Sci. Conf. 4-th. Houston TX: LPI. – 1973. – P. 463-465.
52. Grossman J. J., Mukherjee N. R., Ryan J. A. Microphysical, microchemical and adhesive properties of lunar material III: Gas interaction with lunar material // Proc. Lunar. Sci. Conf., 3d. Houston TX: LPI. – 1972. – P. 2259-2269.
53. Cadenhead D., Brown M., Rice D., Stetter J. Some surface area and porosity characterization of lunar soils // Proc. Lun. Sci. Conf. 8th. Houston TX: LPI. – 1977. – P. 1291-1303.
54. Lebovsky L. A., Jones T. D., Owensby P. D., Fierberg M. A., Consolmagno G. J. The nature of low albedo asteroids from 3- μ m spectrophotometry // Icarus. – 1990. – V. 83. – P. 12-26.
55. Wittenberg L., Santarius J., Kulchinski G. Lunar source of ³He for fusion power // Fusion

Technology. – 1986. – V. 10. – P. 167-178.

56. *Тейлор Л., Калсинский Дж.* Лунный Гелий-3 в термоядерной энергетике: Персидский залив XXI века // Астрон. вестн. – 1999. – Т. 33, №5. – С. 386-394.

57. *Johnson J., Swindle T., Lucey P.* Estimated solar wind-implanted helium-3 distribution on the Moon // Geophys. Res. Let. – 1999. – V. 26. – P. 385-388.

58. *Haskin L., Warren P.* Lunar chemistry // Lunar sourcebook. Eds. Heiken, G. H., Vaniman, D. T., French, B. M. N. Y.: Cambridge Univ. Press. – 1991. – P. 357-474.

59. *Eberhardt P., Geiss J., Graf H. et al.* Trapped solar wind noble gases, exposure age and K/Ar-age in Apollo 11 lunar fine material // Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf. Houston TX: LPI. – 1970. – P. 1037-1070.

60. *Taylor L. A.* Hydrogen, helium, and other solar-wind components in lunar soil: abundance and predictions // Engr., Constr., Oper. in Space II. ASCE Publ., Proc. of Space '90. – 1990. – P. 68-78.